

HETERO-JUNCTION BIPOLAR TRANSISTOR(HBT)

Patent Number: JP8241896
Publication date: 1996-09-17
Inventor(s): HONGO SADAHITO; MORITSUKA KOHEI
Applicant(s):: TOSHIBA CORP
Requested Patent: ☐ JP8241896
Application Number: JP19950045298 19950306
Priority Number(s):
IPC Classification: H01L21/331 ; H01L29/73
EC Classification:
Equivalents:

Abstract

PURPOSE: To markadly improve a high-speed operating property and long term reliability by making a lattice constant of an emitter layer different from a lattice constant of a base layer by an amount within a particular range.

CONSTITUTION: In a hetero-junction bipolar transistor HBT comprising a structure in which a first conductivity type collector layer 23, a second conductivity type base layer 24, and a first conductivity type emitter layer 25, consisting of a semiconductor layer having a forbidden band width larger than that of the second conductivity type base layer 24, are laminated successively, the lattice constant of the emitter layer 24 is made different from the lattice constant of the base layer 24 by an amount within a range of 0.1-1%. Therefore, In composition in $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ can improve the long term reliability as to energization by selecting it so that lattice matching with the base layer is not achieved. Also, because the In composition x can be selected so that it has a value deviated from the lattice matching value, the degree of design freedom for InGaP/GaAs HBT is increased.

Data supplied from the esp@cenet database - I2

11988 U.S. Pat.
10/046741
01/17/02

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開平8-241896

(43)公開日 平成8年(1996)9月17日

(51)Int.Cl.⁶

H 0 1 L 21/331

29/73

識別記号

庁内整理番号

F I

H 0 1 L 29/72

技術表示箇所

審査請求 未請求 請求項の数5 O L (全 10 頁)

(21)出願番号 特願平7-45298

(22)出願日 平成7年(1995)3月6日

(71)出願人 000003078

株式会社東芝

神奈川県川崎市幸区堀川町72番地

(72)発明者 本郷 稔人

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1 株式会

社東芝研究開発センター内

(72)発明者 森塚 宏平

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1 株式会

社東芝研究開発センター内

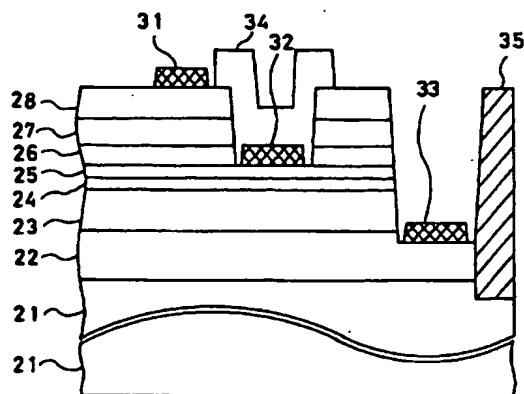
(74)代理人 弁理士 三好 秀和 (外3名)

(54)【発明の名称】 ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT)

(57)【要約】

【目的】 ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) の長期信頼性の向上、オフセット電圧の低減あるいは高周波特性の向上を目的とする。

【構成】 InGaP/GaAs系のHBTにおいて In_xGa_{1-x}Pエミッタ層のInの組成xを、In_xGa_{1-x}Pの格子定数がInGaAsベース層あるいはGaAsベース層の格子定数よりわずかに小さな格子定数あるいはわずかに大きな格子定数となるように選ぶことにより高い長期信頼性を得ると共に、さらにオフセット電圧の低減、ウェハのそりの緩和、あるいは高周波特性の改善をする。



【特許請求の範囲】

【請求項1】 第1導電型のコレクタ層と、第2導電型のベース層と、該ベース層よりも禁制帯幅の大きい半導体層からなる第1導電型のエミッタ層とが順次積層された構造を具備するヘテロ接合バイポーラトランジスタ

(以下HBTという)において、該エミッタ層の格子定数の値と、該ベース層の格子定数の値とが、0.1~1%の範囲で互いに異なることを特徴とするHBT。

【請求項2】 前記エミッタ層の格子定数が、前記ベース層の格子定数に比して小さいことを特徴とする請求項1記載のHBT。

【請求項3】 前記エミッタ層の格子定数が、前記ベース層の格子定数に比して大きいことを特徴とする請求項1記載のHBT。

【請求項4】 前記コレクタ層および前記ベース層はGaAsにより構成され、前記エミッタ層がInGaPで構成されていることを特徴とする請求項1~3のいずれかに記載のHBT。

【請求項5】 前記ベース層にInが含有されていることを特徴とする請求項4記載のHBT。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、超高速LSI、超高速・大容量光通信、マイクロ波帯からサブミリ波帯さらにはテラヘルツ帯での通信等に用いられるヘテロ接合バイポーラトランジスタ(以下HBTという)に関する。より詳細には、HBTの長寿命化・高信頼性化・高速化・高効率化等の特性の改善に関する。

【0002】

【従来の技術】マイクロ波ICの分野ではSiバイポーラトランジスタに対して圧倒的な優位性を持つGaAs FETも、デジタルICではその集積規模が大きくなると、配線負荷容量等のために、必ずしも素子単体の性能を生かし切れなくなる。しかし、HBTの相互コンダクタンス g_m は標準的なGaAs MESFETに比べ、10~20倍も大きい。したがって、この電流駆動能力の高さと、III-V族化合物半導体が備えている優れた電子輸送特性からもたらされる高速性が、HBTの開発のひとつの原動力となっているといえる。すなわち、HB*

$$E_g = 2.854 - 1.720x + 0.6043x^2 \dots (1)$$

と表わされる(たとえばC. P. Kuo et al., J. Appl. Phys. 57 (1985) 5428 頁を参照)とされるが、 $In_x Ga_{1-x} P$ エミッタ層は組成 $x = 0.48$ においてのみGaAsベース層に格子整合する。したがって $In_x Ga_{1-x} P/GaAs$ 系のHBTの設計の自由度は特定の組成 x に限定されるため極めて小さいものであった。そしてこの場合、エミッタ $In_x Ga_{1-x} P$ 層の伝導帯と、ベースGaAs層の伝導帯とのバンド不連続は約0.2 eVも存在する(たとえばT. W. Lee et. al., Appl. Phys. Lett. 60 (1992) 474頁を参照)。このため、電流

* Tの特長は、

- (1) 相互コンダクタンス g_m が高いこと。
- (2) しきい値がベースのバンドギャップでほぼ決まるのでエビ厚やドーピング密度に対して安定である。
- (3) 電流制御がベースのポテンシャルによるので、FETにおけるいわゆる短チャネル効果に相当するようなスケールダウンにともなう特性劣化がない。
- (4) 入力/出力分離が良いため、出力コンダクタンスが十分に小さい。
- (5) 素子表面の影響が少ないため $1/f$ ノイズが小さい。

【0003】などである。現在までこのHBT構造でもっとも成功しているのは、 $Al_x Ga_{1-x} As$ とGaAsの組み合わせを用いた材料を基本としたものである。これは主に、GaAsの電子の輸送特性が高速動作に適している事と、GaAsと $Al_x Ga_{1-x} As$ では格子不整合がほとんどなく、結晶成長が容易で、良質のヘテロ接合を容易にエピタキシャル成長等により得ることができることによる。

【0004】

【発明が解決しようとする課題】しかし、 $Al_x Ga_{1-x} As$ をエミッタ材料として用いた場合、 $Al_x Ga_{1-x} As$ 中に存在するDXセンターが起因となり、素子の劣化を促進してしまう問題がある。長期信頼性を考えた場合、Alを含まない材料が望まれており、近年、 $In_x Ga_{1-x} P$ をエミッタ材料として用いたHBTが各所で発表されている。この系は、DXセンターが存在せず、表面再結合速度が小さい、またバンドの配置がHBTにとって好ましい、等の利点があるとされているためである。

【0005】しかし、 $Al_x Ga_{1-x} As/GaAs$ 系では、 $Al_x Ga_{1-x} As$ とGaAsは格子整合しているため、伝導帯のエネルギー不連続値を変化させるためには、Alの組成 x を変えて $Al_x Ga_{1-x} As$ の禁制帯幅を変えれば良かった。ところが、 $InGaP$ 系の場合、 $In_x Ga_{1-x} P$ とGaAsはある組成比のみで格子整合する。したがって、事情は複雑になる。たとえば $In_x Ga_{1-x} P$ の禁制帯幅はInの組成を x として

一電圧特性においてオフセット電圧として現れてしまうが、格子整合の観点からバンド不連続値を小さくできない問題があった。

【0006】一方、この組成 x においては、エミッタからベースへの電子の注入エネルギーの観点からすれば、0.2 eVというバンド不連続の値は小さく、したがって注入エネルギーは必ずしも大きくないが、格子整合の都合上、バンド不連続値を大きくできないという問題があった。このため従来の $InGaP/GaAs$ 系のHBTが高速動作できないという欠点があった。この電子の

注入エネルギーについてもう少し詳しく説明すれば、以下になる。つまり、HBTの遮断周波数 f_T は、電子のエミッタ・コレクタ走行時間 τ_{ec} を用いて $f_T = 1/2\pi\tau_{ec}$ (2)

と表わされる。電子のエミッタ・コレクタ走行時間 τ_{ec} は、

$$\tau_{ec} = \tau_e + \tau_b + \tau_x + \tau_c \quad \cdots \cdots (3)$$

である。ここで、 τ_e はエミッタ充電時間、 τ_b はベース走行時間、 τ_x はコレクタ空乏層走行時間、 τ_c はコレクタ充電時間である。式(2)、および式(3)よりHBTの遮断周波数 f_T 向上のためには、ベース走行時間 τ_b の短縮は重要であり、エミッタからベースへの電子の注入エネルギーを大きくすることが効果的であることがわかる。そこで、エミッタ・ベース界面における伝導帯のエネルギー不連続を大きくしたいが、 $In_x Ga_{1-x} P/GaAs$ ヘテロ接合の場合は格子整合しなくなってしまうのでできないため従来の $InGaP/GaAs$ 系HBTは設計の自由度が小さく、高周波動作が困難であるという問題があった。

【0007】さらに従来の $InGaP/GaAs$ 系HBTでは長期に通電試験を行った際に、ベース層中で発生した転位が増殖し、これがエミッタ層にまで転位を及ぼし、その結果、再結合電流が増加し、電流増幅率の低下を引き起こすため、長期信頼性が保証されていないという問題があった。たとえば従来の $InGaP/GaAs$ 系HBTにおけるコレクタ電流密度 $J_c = 5 \times 10^4 A/cm^2$ 、接合温度 $200^\circ C$ における平均故障間隔MTTF (Mean Time to Failure) は、電流増幅率10%低下を故障とみなすと $10^6 h$ 程度であった。

【0008】以上のように、格子整合上の制約があるため高速動作特性、長期信頼性に優れ、なおかつオフセット電圧の小さい $InGaP/GaAs$ 系HBT、あるいは電子の注入エネルギーの大きい $InGaP/GaAs$ 系HBTは、未だに得られていない。

【0009】本発明は、上記の点を鑑みなされたもので、高速動作性と長期信頼性を飛躍的に向上させ、しかも、エミッタ層の In の組成 x をある程度自由に变化でき、設計の自由度の大きい $In_x Ga_{1-x} P/GaAs$ 系HBTを提供することを目的とする。

【0010】本発明の他の目的は、 $In_x Ga_{1-x} P/GaAs$ 系HBTの設計の自由度を大きくし、オフセット電圧の小さい低消費電力のHBTも、電子の注入エネ

$$dE_c = a_c (\Delta\Omega/\Omega)$$

ここで、 a_c は伝導帯の変形ポテンシャル (deformation potential) である。歪みによる体積の変化率 $\Delta\Omega/\Omega$

$$\Delta\Omega/\Omega = 2(1 - c_{12}/c_{11}) \cdot (a_0/a - 1) \cdots (5)$$

と書ける。ここで、 c_{12} 、 c_{11} は弾性力定数 (elastic stiffness constant)、 a_0 は基板の格子定数、 a はエピタキシャル層の格子定数である。式(4)および式

*ルギーの大きい高速動作のHBTも自由に設計できるHBTを提供することである。

【0011】本発明の他の目的は $In_x Ga_{1-x} P/GaAs$ ヘテロ接合、あるいは $In_x Ga_{1-x} P/InGaAs$ 等の格子整合する組成 x の値が限定されているヘテロ接合においてこの格子整合する組成 x の範囲を超えて、所定の範囲内で自由に接合界面のエネルギー不連続値を変化、すなわち大きくすることも小さくすることも可能な設計の自由度の大きなHBTを提供することである。

【0012】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するために、本発明の特徴は図1および図5に示すように、第1導電型のコレクタ層23と、第2導電型のベース層24と、ベース層24よりも禁制帯幅 E_g の大きい半導体層からなる第1導電型のエミッタ層25、45とが順次積層された構造を具備するHBTであって、エミッタ層24、45の格子定数が、ベース層24の格子定数に対し、0.1~1%の範囲で異なることである。

【0013】0.1~1%の範囲で異なる場合は2通りある。つまり、(1)図1に示すように、エミッタ層25の格子定数が、ベース層24の格子定数に比して小さい場合、および、(2)図5に示すように、エミッタ層45の格子定数が、ベース層24の格子定数に比して大きい場合である。いずれの場合においても、好ましくはコレクタ層23およびベース層24は $GaAs$ により構成され、エミッタ層25、45が $InGaP$ で構成されていることである。さらに、好ましくはベース層24に In が含有されていること、つまりベース層24は $InGaAs$ で構成されていることである。

【0014】

【作用】本発明の特徴によれば、エミッタ層の $InGaP$ 層の格子定数がベース層の $GaAs$ 層或いは $InGaAs$ 層の格子定数から少しずれた値になるように、 In と Ga の組成比を決定されている。まず、ベース層が $GaAs$ により構成されている場合について説明する。この場合、 $InGaP$ エミッタ層にわずかな歪みを導入することによって、 $GaAs$ ベース層とのバンドの不連続を低減する。歪みが入った場合の伝導帯のエネルギー変化 dE_c は、以下のように記述できる (たとえば、Y. Hirayama et al., J. Appl. Phys. 74 (1993) 570を参照)。

【0015】

$$\cdots \cdots \cdots (4)$$

※ Ω は、

(5)を基にして、歪みが入った $InGaP$ における伝導帯のエネルギー変化は求められる。任意の組成比 x を持つ $In_x Ga_{1-x} P$ に対する上記パラメータは、ベガ

ード則 (Vegard's law) に従って、 InP と GaP のパラメータを組成比 x で内挿して算出すればよい。

【0016】ここで、 GaAs に対して $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ の組成 $x=0.48$ で格子整合するが、請求項3記載のように $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ の格子定数が GaAs の格子定数より大きい場合を考えてみる。たとえばエミッタ層の In 組成比が $x=0.55$ の場合、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ と GaAs とは格子整合せず、この場合の格子不整合の割合 $\Delta a/a=+0.48\%$ である。このとき、 InGaP には圧縮応力が働いている。上記の式 (4) および (5) による計算から、歪みがない InGaP に対するときに比べて、伝導帯のエネルギーが 53.5meV 上昇することが分かる。 InGaP の禁制帯幅の変化は、 GaAs に格子整合している場合より、 77meV 減少する。今、その半分が伝導帯のエネルギー位置に寄与すると考えると、 38.5meV の減少である。結局、伝導帯のエネルギー不連続は、差し引きの 15meV 大きくなる。同様に $x=0.53$ の場合、伝導帯のエネルギーは差し引き 9meV 大きくなる。また $x=0.53$ における $\Delta a/a=+0.33\%$ である。その結果、エミッタからベースに注入される電子のエネルギーが大きくなり、ベース走行時間 τ_b の短縮ができる。

【0017】また、このように In 組成比をより大きくした構成にすることにより、転位の増殖が抑制され、エミッタの信頼性が大きく向上する。また、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ における In 組成 x を大きくし、圧縮歪みを導入することにより、エミッタ・ベース界面における伝導帯のエネルギー不連続が大きくなり、高周波特性が向上する。

【0018】同様にして、請求項4記載のように $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ の格子定数が、 GaAs の格子定数よりも小さい場合、たとえば In 組成比 $x=0.44$ では $\Delta a/a=-0.33\%$ で、伝導帯のエネルギー不連続は 13meV 小さくなる。 $x=0.42$ では $\Delta a/a=-0.48\%$ で、伝導帯のエネルギー不連続は 16meV 小さくなる。その結果、電流-電圧特性におけるオフセット電圧が低下し、低消費電力化が可能となる。

【0019】次に、請求項5記載のように、ベース層に In を添加した場合について説明する。ベース層への In の添加量は組成にして $0\sim 0.1$ 程度が望ましい。たとえば、組成比にして 0.1 の In を添加した $p\text{-In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ ベース層上に、 $n\text{-In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ エミッタ層を成長した場合においては、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ の組成 $x=0.58$ で格子整合する。このときの $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ の格子定数 $a=0.5694\text{nm}$ で、禁制帯幅 $E_g=1.278\text{eV}$ である。 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ エミッタ層の格子定数が $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ の格子定数よりも小さい場合、たとえば In 組成 $x=0.51$ の場合、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ と $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ とは格子整合せず不整合 $\Delta a/a=-0.52\%$ である。こ

のとき、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ には引っ張り応力が働いている。前述と同様に (4) 式、(5) 式による伝導帯のエネルギーの下降分、および $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ の禁制帯幅の増加分との差し引きをして、歪みがないときに比べて、伝導帯のエネルギー不連続が 21meV 低下することが計算される。また In 組成 $x=0.53$ では $\Delta a/a=-0.38\%$ で $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ には引っ張り応力が働き、伝導帯のエネルギー不連続は 15meV 低下する。したがって請求項5記載の本発明の特徴によれば、エミッタ・ベース界面における伝導帯の不連続が低減され、その結果、電流-電圧特性において、オフセット電圧が低下する。さらに本発明の特徴によれば、ベース層に In を添加しているため、通電により発生した転位の増殖を妨げ、素子の信頼性が向上する。

【0020】同時に、 GaAs 基板に対して、 InGaAs ベース層は圧縮応力が働いているが、エミッタ層として、引っ張り応力が働く $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ 層 (In の組成比 x を少なめにして) を積層しているので、ウェハ全体の応力を相殺し、ウェハのそりが緩和される。従来の InGaAs ベース層を用いたウェハのそりは、2インチウェハにおいて中心と周辺で $10\mu\text{m}$ 程度も発生する場合がありプロセス上、特に露光の工程では微細パターンの形成に対して、非常に大きな障害となっていたが、本発明によれば、4インチウェハにおいても露光に障害が生じないまでにウェハのそりが緩和され、微細パターンのフォトリソグラフィー (あるいは電子線リソグラフィー、X線リソグラフィー) が容易となるため、HBT集積回路の高密度化およびHBTの高速化が可能となる。

【0021】なお、熱伝導率は GaP では $1.1(\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K})$ 、 InP では $0.7(\text{W}/\text{cm}\cdot\text{K})$ である。したがって、格子整合した InGaP に比べて、本発明のように In の組成比を少なくした系では、熱伝導率が大きく、熱放散が良好であるので、高集積化が良好となる。すなわち単位面積当りの発熱量を低下できる。また熱放散が良好であることは、パワートランジスタとして用いる場合にも大いに有利である。

【0022】また、請求項5記載のベースに In を添加した場合において、エミッタの In の組成 x を格子整合する場合の値よりも大きくした場合について説明する。ベースの $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ の In の組成 $x=0.1$ の場合、エミッタの $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ の組成 $x=0.58$ でベースの $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ と格子整合することは既に述べたが、 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ の組成 $x=0.65$ で $\Delta a/a=+0.51\%$ となり、圧縮応力が $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ に働くことになる。禁制帯幅 E_g の減少分を差し引くと、(4) 式、(5) 式から伝導帯のエネルギー不連続は 24meV 増加する。同様に $\text{In}_{0.63}\text{Ga}_{0.37}\text{P}$ は $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ に対して $\Delta a/a=+0.36\%$ で、伝導帯のエネルギー不連続は 16meV 増加す

る。この結果 $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ エミッタから $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ベースに注入される電子のエネルギーが大きくなり、ベース走行時間 τ_b が短縮され、HBTの遮断周波数 f_T が増大する。

【0023】本発明の InGaP/GaAs 系HBTにおいて、 InGaP エミッタ層に格子歪みを導入することによる素子の信頼性向上は図8に示すようなゲッタリング現象と等価な効果により説明できる。 Si デバイスではゲッタリング効果はかなり一般的に用いられているが、 InGaP/GaAs 系HBTにおいても Si におけるゲッタリング現象と等価な効果が生じる。図8に模式的に示している通り、引っ張り歪みにせよ、圧縮歪みにせよ InGaP エミッタ層に歪みを導入することにより、トランジスタ真性領域に発生した点欠陥を、歪みにより外部領域に排出することができる。その結果、欠陥をトランジスタ動作に対して不活性な領域に排出し、トランジスタ動作の信頼性向上を図ることができる。

【0024】図9に本発明によるゲッタリング効果が素子の信頼性に対して与える効果を模式的に示す。図9において、 y 軸は素子に内在するエネルギーに相当する量である。図9の原点が格子整合の場合である。したがって、 y 軸の下方に信頼性が向上することを表わしている。図9で示すように、ゲッタリングにより、結晶歪みが入る程、信頼性向上への寄与が増加する。逆に、結晶歪みによる欠陥の生成が及ぼす逆効果と併せて考えると、図9に示すように、格子整合条件からわずかにずれた条件において、エネルギーの極小値が現れる。本発明は、この極小部分を狙ったものである。

【0025】このように、本発明によれば、信頼性を向上させることができると同時に $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ の組成 x を格子整合する場合の値より小さくした場合は、素子のオフセット電圧の低減も同時に図ることができ、低消費電力化が可能となる。したがってHBTを用いた論理IC等の高集積化が可能となる。また、プロセス上、大きな障害となるウェハのそりも解決できる。

【0026】また $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{P}$ の組成 x を格子整合する場合の値より大きくした場合は、ベース走行時間 τ_b が短縮され、高周波動作が可能となる。

【0027】

【実施例】図1は、本発明の一実施例に係る GaAs ベース層を有するエミッタトップ n-p-n 型HBTの断面図である。半絶縁性 GaAs 基板21に順次、 n^+ 型 GaAs コレクタコンタクト層22、 n 型 GaAs コレクタ層23、 p^+ 型 GaAs ベース層24、 n 型 $\text{In}_{0.44}\text{Ga}_{0.56}\text{P}$ エミッタ層25、 n 型 GaAs 層26、 n 型 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 層27、 n^+ 型 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ エミッタコンタクト層29が積層構造となっている。ここでたとえば、 n^+ 型 GaAs コレクタコンタクト層22は500nm、 Si 濃度 $6 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、 n 型 GaAs コレクタ層600nm、 Si 濃度 $5 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$ 、 p^+ 型 GaAs ベース層24は50nm、 Be 濃度 $5 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、 n 型 $\text{In}_{0.44}\text{Ga}_{0.56}\text{P}$ エミッタ層25は30nm、 Si 濃度 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、 n 型 GaAs 層26は30nm、 Si 濃度 $1 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ 、 n 型 $\text{In}_y\text{Ga}_{1-y}\text{As}$ 層27は50nm、 Si 濃度 $3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ 、 n 型 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ エミッタコンタクト層29は50nm、 Si 濃度 $3 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ である。図1では、エミッタ電極31として $\text{Ti}/\text{Pt}/\text{Au}$ を n^+ 型 $\text{In}_{0.5}\text{Ga}_{0.5}\text{As}$ エミッタコンタクト層28の上に、ベース電極として $\text{Pt}/\text{Ti}/\text{Pt}/\text{Au}$ を p^+ 型 GaAs ベース層24の上へ、コレクタ電極として $\text{AuGe}/\text{Ni}/\text{Ti}/\text{Au}$ を n^+ 型 GaAs コレクタコンタクト層22の上にそれぞれ積層した構造をとっている。

【0028】図1に示したHBTを製造するにはまず、減圧MOCVD法、MBE法、CBE法 (Chemical Beam Epitaxy 法)、ALE法 (Atomic Layer Epitaxy 法)、あるいはMLE法 (Molecular Layer Epitaxy 法) 等を用いて、図2に示すように、 GaAs 基板21上に、 GaAs 層22、23、24、 InGaP 層25、 GaAs 層26、 InGaAs 層27、28を形成する。例えばCBE法で成長する場合、圧力 $1.3 \times 10^{-3} \text{Pa}$ において、基板温度 520°C で、TEG (トリエチルガリウム) と AsH_3 (アルシン) を導入し GaAs 層22、23、24を成長し、TEG、TMIn (トリメチルインジウム) と PH_3 (フォスフィン) で InGaP 層25、再びTEGと AsH_3 で GaAs 層26を成長し、最後にTEG、TMInと AsH_3 で InGaAs 層27、28を同一チャンバー中で連続的に成長すればよい。 AsH_3 のかわりにTBA (ターシャリー・ブチル・アルシン ($(\text{C}_4\text{H}_9)\text{AsH}_2$)) を用いてもよく、 PH_3 のかわりにTBP (ターシャリー・ブチル・フォスフィン ($(\text{C}_4\text{H}_9)\text{PH}_2$)) を用いてもよい。 p 型のドーパントとしてはたとえば、TMG (トリメチルガリウム) や固体のBeソースを用いればよい。 n 型のドーパントとしては固体スズ (Sn)、 SiH_4 (モノシラン)、 Si_2H_6 (ジシラン)、TESn (トリエチルスズ)、あるいはDESe (ジエチルセレン)、DETe (ジエチルテルル) 等を用いればよい。またCBE法に用いるソースガスを交互導入し、半導体基板上の交換表面反応を用いればMLE法となる。たとえば基板温度 $350^\circ\text{C} \sim 450^\circ\text{C}$ 、圧力 $6 \times 10^{-4} \text{Pa}$ においてTEGを4秒導入、3秒真空排気、 AsH_3 を20秒導入、その後3秒真空排気のカサイクルで GaAs 1分子層が成長できるので、MLE法によれば図2の積層ウェハは分子層単位の精度を有した構造となる。

【0029】次に全面にパッシベーション膜としてシリコン酸化膜を堆積する。まず、最初にプロトンイオン注入により素子間分離領域35を形成する。さらに、こ

のウェハ上にフォトリソでベース電極取り出し用のU溝エッチングのためのマスクパターンを形成し、それを用いてシリコン酸化膜をエッチング後、InGaAs層28、27、GaAs層26、およびInGaP層25をRIE法あるいはECRIオンエッチ法により p^+ GaAsベース層24の上部に n In_{0.44}Ga_{0.56}Pエミッタ層25が薄く残るようにエッチングしU溝を形成する。この後フォトリソマスクをつけた状態でさらにウェットエッチングによってU溝の側壁の半導体層を僅かにサイドエッチングする。このサイドエッチングの量でベース電極とエミッタ領域の分離が決まる。サイドエッチング量の最適値はエビ膜の構成や膜質あるいはパターンサイズその他に依存するが、たとえば0.1 μ m程度行えばよい。ここでは主なエッチング手段としてドライエッチングを用いたが、ウェットエッチングのみでも可能である。続いてベース電極Pt/Ti/Pt/Auをウェハ全面に蒸着し、その後フォトリソを除去する、いわゆるリフトオフ法によってベース電極32をU溝の底部に形成する。その後ランプアニール炉等で350℃程度の熱処理を施し、ベース電極層32の最下層のPtを n In_{0.44}Ga_{0.56}Pエミッタ層25と反応拡散させ p^+ 型GaAs層24まで突き抜けさせることにより、 p^+ 型GaAsベース層24との電気的接触を得ている。図1は模式的であり、ベース電極層32がベース層に接触していないような印象を与えるが、Ptのアロイ層により接触していることに注意されたい。このような製造工程により、ベース領域は、ガードリングを併せ持つ構造となり、電流増幅率の向上を得ることができる。次に、ベース電極とエミッタ電極の絶縁層を形成するため、基板表面全体にポリイミド樹脂のプレポリマー溶液をスピコート法により塗布し、このポリイミド樹脂の熱硬化温度(350℃)まで段階的に加熱して全面にポリイミド樹脂34を形成する。次にCF₄/O₂を用いたRIE法等によりし、U溝内のベース電極32上のみにポリイミド樹脂34を残すように全面のポリイミド樹脂34をエッチングする。その後 n^+ 型GaAsコレクタコンタクト層22をウェットエッチングによって露出させAuGe/Ni/Ti/Auを蒸着後、パターンニングし、さらに370℃程度の熱処理によりアロイを行う。その後フォトリソグラフィにより図1に示すようにパターンニングし、コレクタ電極33を形成する。その後シリコン酸化膜を除去後、Ti/Pt/Auを真空蒸着し、エミッタ電極31を形成する。この工程ではエミッタ電極形成用のコンタクトホール開孔は自己整合的に形成され、エミッタ面積の小面積化が可能で、高周波動作に適した構造となる。なお、 p^+ 型GaAsベース層24のかわりに p^+ 型In_xGa_{1-x}Asベース層を用いてもよい。この場合 p^+ 型In_{0.1}Ga_{0.9}Asが望ましい。すなわちInの組成 x は0~0.1が好ましい値である。InGaAsベースとすることで、通電によ

り発生した転位の増殖が妨げさらに素子の信頼性が向上する。また、ベース接触抵抗も低減され最大発振周波 f_{max} が向上する。

【0030】In_xGa_{1-x}PはIn組成 $x=0.48$ でGaAsベース層24と格子整合するが、本発明の実施例では組成 $x=0.44$ であるため格子不整合 $\Delta a/a=-0.33\%$ である。したがってIn_{0.44}Ga_{0.56}Pエミッタ層25には引っ張り応力が働いている。禁制帯幅 E_g は格子整合しているIn_{0.48}Ga_{0.52}Pの場合に比して増加するが、式(4)、式(5)から計算されるように伝導帯のエネルギーが減少する。結局、この両者の差し引きより、In_{0.44}Ga_{0.56}Pエミッタ層25とGaAsベース層24との間の伝導帯のエネルギー不連続は13 meV減少する。このためHBTの電流-電圧特性のオフセット電圧が減少し、HBTの低消費電力化が可能となる。

【0031】図3にこのようにして作製した本発明の第1の実施例に係るHBTの典型的な電流-電圧特性を示す。比較として従来例によるGaAsに完全に格子整合したInGaPエミッタ層を持つHBTの特性もあわせて示してある。本発明の第1の実施例では、従来例に比べて、オフセット電圧が小さくなっていることがわかる。また、通電による電流増幅率の低下も見られず、長期信頼性の面でも優れている。図4には、信頼性を示す尺度である平均故障間隔MTTFを格子歪みに対して、プロットしてある。コレクタ電流密度 $J_c=5 \times 10^4$ A/cm²、接合温度200℃において、電流増幅率10%を故障とみなした場合である。ベース層の格子定数に対して、エミッタ層の格子定数が小さくなると徐々にMTTFは向上する。格子歪み $\Delta a/a$ が1%を越えると、格子不整合が大きすぎ、結晶成長の段階でエミッタ層に転位が生じてしまい、却ってMTTFは低下する。格子歪 $\Delta a/a=0.5\%$ 近傍ではMTTFは 10^7 h程度であり、従来の格子整合したHBTにおけるMTTFの10倍以上の値が得られた。

【0032】図5は、本発明の第2の実施例に係るInGaAsベース層を有するエミッタトップnpn型HBTの断面図であり、エミッタ層の格子定数をベース層の格子定数より大きくした場合である。半絶縁性GaAs基板21に順次、 n^+ 型GaAsコレクタコンタクト層22、 n 型GaAsコレクタ層23、 p^+ 型InGaAsベース層24、 n 型In_{0.65}Ga_{0.35}Pエミッタ層25、 n 型GaAs層26、 n 型In_yGa_{1-y}As層27、 n^+ 型In_{0.5}Ga_{0.5}Asエミッタコンタクト層29が積層構造となっている。ここでたとえば、 n^+ 型GaAsコレクタコンタクト層22は500 nm、Si濃度 6×10^{18} cm⁻³、 n 型GaAsコレクタ層600 nm、Si濃度 5×10^{16} cm⁻³、 p^+ 型In_{0.1}Ga_{0.9}Asベース層24は50 nm、Be濃度 5×10^{19} cm⁻³、 n 型In_{0.65}Ga_{0.35}Asエミッタ層25は3

0 nm、Si濃度 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、n型GaAs 26は30 nm、Si濃度 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、n型 $\text{In}_y \text{Ga}_{1-y} \text{As}$ 層27は50 nm、Si濃度 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ 、 n^+ 型 $\text{In}_{0.5} \text{Ga}_{0.5} \text{As}$ エミッタコンタクト層29は50 nm、Si濃度 $3 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ である。

【0033】図5は図1と同様にエミッタ電極31としてTi/Pt/Auを n^+ 型 $\text{In}_{0.5} \text{Ga}_{0.5} \text{As}$ エミッタコンタクト層28の上に、ベース電極としてPt/Ti/Pt/Auを p^+ 型 $\text{In}_{0.1} \text{Ga}_{0.9} \text{As}$ ベース層24の上へ、コレクタ電極としてAuGe/Ni/Ti/Auを n^+ 型GaAsコレクタコンタクト層22の上にそれぞれ積層した構造をとっている。図5に示した本発明の第2の実施例のHBTを製造するには、減圧MOCVD法、MBE法、CBE法、ALE法、あるいはMLE法等を用いて、図2に示すように、GaAs基板21上に、GaAs層22、23、InGaAs層24、InGaP層25、GaAs層26、InGaAs層27、28を形成して、本発明の第1の実施例と同様な工程で製造すればよく、ここでは説明を省略する。

【0034】 $\text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{P}$ は $\text{In}_{0.1} \text{Ga}_{0.9} \text{As}$ と組成 $x=0.58$ で格子整合するので、 $x=0.65$ では格子不整合 $\Delta a/a=0.51\%$ である。このとき $\text{In}_{0.65} \text{Ga}_{0.35} \text{P}$ エミッタ層25には圧縮応力が働き、 $\text{In}_{0.58} \text{Ga}_{0.42} \text{P}$ エミッタ層の場合に比し、禁制帯幅 E_g の減少分を考慮して24 meVだけ伝導帯のエネルギー不連続が大きくなる。したがって $\text{In}_{0.65} \text{Ga}_{0.35} \text{P}$ エミッタ層25から $\text{In}_{0.1} \text{Ga}_{0.9} \text{As}$ ベース層24への電子の注入エネルギーが大きくなり、ベース走行時間の τ_b の短縮ができる。

【0035】図6にこのようにして作製した本発明の第2の実施によるHBTの典型的な周波数特性を示す。比較として従来例によるGaAsに完全に格子整合したInGaPエミッタ層を持つHBTの特性もあわせて示してある。ベース走行時間 τ_b が短縮されたため、従来例に比べて遮断周波数 f_T が向上していることが分かる。また、通電による電流増幅率の低下も見られず、長期信頼性の面でも優れている。図7には、信頼性を示す尺度であるMTTFを格子歪み $\Delta a/a$ に対して、プロットしてある。ベース層の格子定数に対して、エミッタ層の格子定数が大きくなると徐々にMTTFは向上する。格子歪み $\Delta a/a$ が1%を越えると、格子不整合が大きすぎ、結晶成長の段階でエミッタ層に転位が生じてしまい、却ってMTTFは低下する。コレクタ電流密度 $J_c=5 \times 10^4 \text{ A/cm}^2$ 、接合温度200℃で、MTTFは 10^7 h の値が格子歪0.5%近傍で得られた。

【0036】なお、本発明はInGaPエミッタ層/GaAsベース層あるいはInGaPエミッタ層/InGaAsベース層にのみ適用されるのではなく、エミッタ層としてInGaP、又はInGaAsP、ベース層としてGaAsあるいはInGaAsを用いる各種組み合

わせに用いてもよく、さらにエミッタ層としてInP、ベース層としてInGaAsを用いる場合にも適用できる。

【0037】

【発明の効果】本発明の請求項1記載の発明によれば、InGaPエミッタ層/GaAsベース層あるいはInGaPエミッタ層/InGaAsベース層等のヘテロ接合を有するHBTにおいて、 $\text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{P}$ のInの組成 x を、ベース層と格子整合させないように所定の範囲内に選ぶことにより、通電による長期信頼性を向上させることが可能とすることができる。

【0038】また、本発明の請求項1記載の発明によれば従来の $\text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{P}/\text{GaAs}$ 系のHBTにおいては格子整合の観点からInの組成 x は特定の値しか許されなかったが、格子整合からずれた値の x を選ぶことができるので $\text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{P}/\text{GaAs}$ 系HBTの設計自由度が飛躍的に増大する。

【0039】本発明の請求項2記載の発明によれば、InGaPエミッタ層/GaAsベース層あるいはInGaPエミッタ層/InGaAsベース層を有するHBTにおいて、 $\text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{P}$ のInの組成 x を、 $\text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{P}$ の格子定数がベース層の格子定数よりエミッタ層の格子定数が小さくなるような所定の範囲内の x の値に選ぶことができるので、電流-電圧特性におけるオフセット電圧を低減し、通電による長期信頼性を向上させ、なおかつウェハのそりも緩和させることが可能となる。

【0040】本発明の請求項3記載の発明によれば、InGaPエミッタ層/GaAsベース層（あるいはInGaAsベース層）を有するHBTにおいて、 $\text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{P}$ におけるIn組成 x を、 $\text{In}_x \text{Ga}_{1-x} \text{P}$ の格子定数がベース層と格子整合する条件よりも大きくなる所定の範囲内の値に選定することができるので、エミッタ・ベース界面における伝導帯の不連続を大きくし、電子の注入エネルギーを大きくすることができる。その結果高周波特性を向上させ、同時に、通電による長期信頼性を向上させることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施例のHBTの断面構造を示す図。

【図2】本発明の第1の実施例に用いるエピタキシャルウェハの断面図。

【図3】本発明の第1の実施例のHBTの電流-電圧特性を従来例と比較説明する図。

【図4】本発明の第1の実施例における格子歪みと素子の信頼性の関係を示す図。

【図5】本発明の第2の実施例のHBTの構造を示す断面図。

【図6】本発明の第2の実施例のHBTの高周波特性を従来例と比較説明する図。

【図7】本発明の第2の実施例における格子歪みが素子の信頼性に与える効果を説明する図。

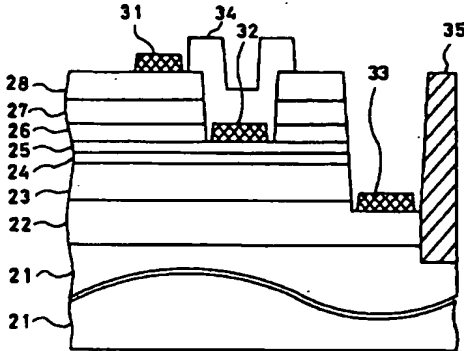
【図8】ゲッタリング効果を説明する模式図。

【図9】ゲッタリング効果と歪みによる影響を説明する図。

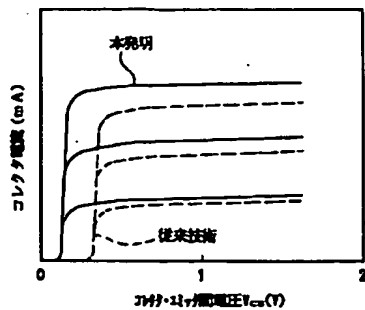
【符号の説明】

- 21 半絶縁性GaAs基板
- 22 n⁺型GaAsコレクタコンタクト層
- 23 n型GaAsコレクタ層
- 24 p⁺型GaAsベース層
- 25 n型In_{0.44}Ga_{0.56}Pエミッタ層

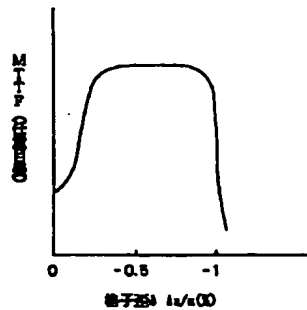
【図1】



【図3】

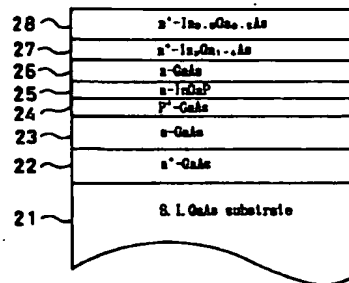


【図4】

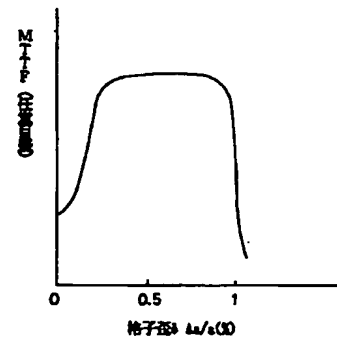


- 26 n型GaAs層
- 27 n⁺型In_yGa_{1-y}Asグレーディング層
- 28 n⁺型In_{0.5}Ga_{0.5}Asエミッタコンタクト層
- 31 エミッタ電極
- 32 ベース電極
- 33 コレクタ電極
- 34 ポリイミド
- 35 イオン注入等による高抵抗化領域
- 10 45 n型In_{0.65}Ga_{0.35}Pエミッタ層

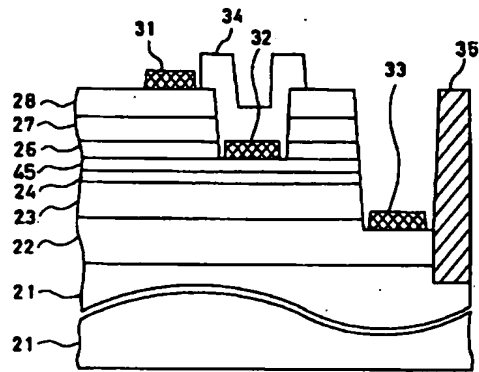
【図2】



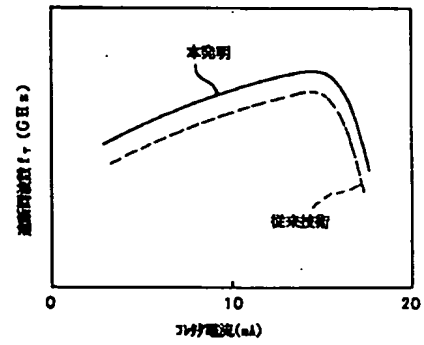
【図7】



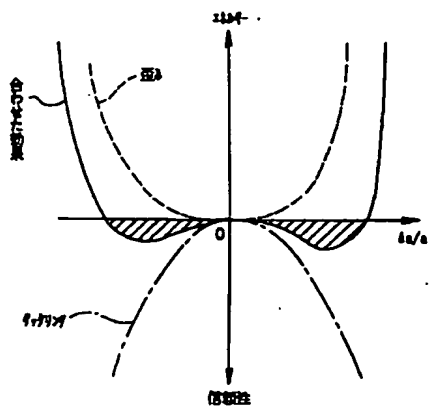
【図5】



【図6】



【図9】



【図8】

